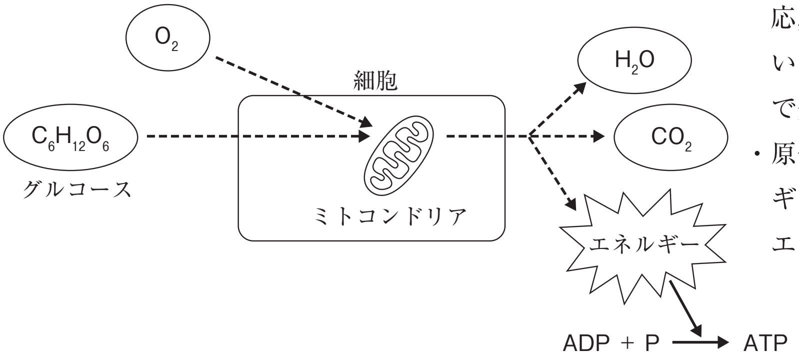
第15講　異化：呼吸

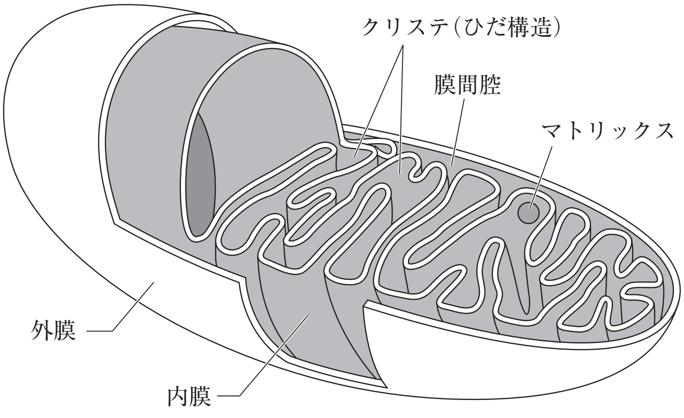
■呼吸



・大局的には有機物の燃焼反応，反応性の高い酸素を用いて，有機物を無機物にまで分解する。
・原子の結合間の化学エネルギーの一部がATPの化学エネルギーに変換される。

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 12H_2O + 38ATP$$

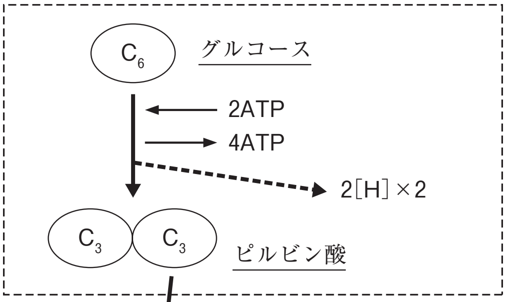
◆ミトコンドリア



ⒸRECRUIT HOLDINGS
本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

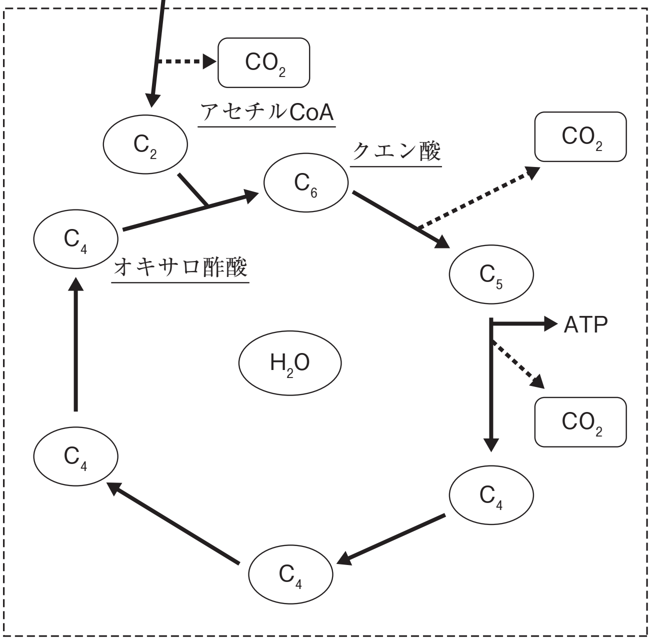
◆呼吸の過程

解糖系
at 細胞質基質



・細胞質基質に存在する酵素によって，グルコースがピルビン酸にまで分解される嫌気的過程。
・解糖系は発酵（乳酸発酵，アルコール発酵）にも共通する原始的なエネルギー生産過程である。

クエン酸回路
at ミトコンドリア
マトリックス

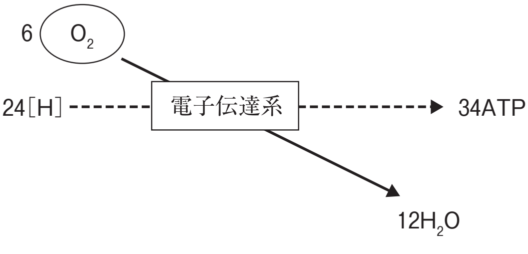


・クエン酸回路が進行する過程で，水素が連鎖的に奪われる（脱水素）ことで基質が段階的に酸化されていく。
・奪われた水素は補酵素と結合して電子伝達系に運ばれる。

ピルビン酸１分子から
ATP　　×
〔H〕　　×

グルコース１分子から
ATP　　×
〔H〕　　×

電子伝達系
at ミトコンドリア
内膜（クリステ）



・電子伝達系にて，還元型補酵素が酸素によって酸化され，酸化型補酵素に戻る。
・その過程で，水素（電子）が持っているエネルギーからATPが合成される。

©RECRUIT HOLDINGS
本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

◆化学反応式

・解糖系

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_3H_4O_3 + 4[H] + 2ATP$$

・クエン酸回路

$$(C_3H_4O_3 + 3H_2O \longrightarrow 3CO_2 + 10[H] + ATP) \times 2$$

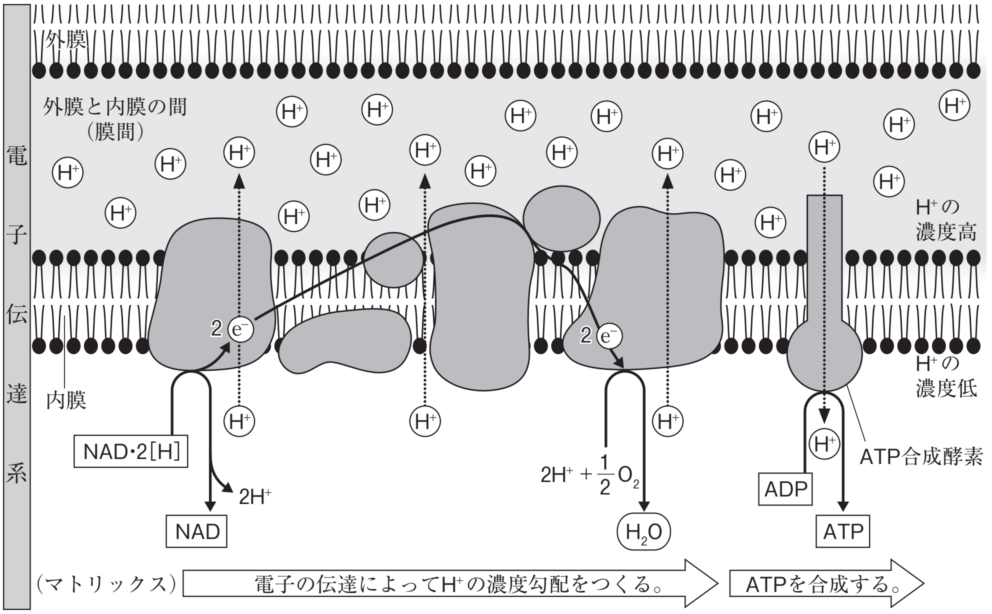
・電子伝達系

$$24[H] + 6O_2 \longrightarrow 12H_2O + 34ATP$$

・呼吸全体

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \longrightarrow 6CO_2 + 12H_2O + 38ATP$$

◆電子伝達系の詳細



ⒸRECRUIT HOLDINGS
本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

◆呼吸商

$$呼吸商 = \frac{呼吸で排出された CO_2}{呼吸で吸収された O_2}（体積比）$$

・呼吸商から<u>呼吸基質</u>を判断可能

何を呼吸の材料としているか

呼吸商	＝	1	⟶	呼吸基質　炭水化物（グルコース）
呼吸商	＝	0.8	⟶	呼吸基質　タンパク質
呼吸商	＝	0.7	⟶	呼吸基質　脂肪
呼吸商	＞	1	⟶	発酵と呼吸の併用

ex

走り始め	呼吸商＝1	植食性動物	呼吸商＝1	イネの発芽	呼吸商＝1
有酸素運動時	呼吸商＝0.7	肉食性動物	呼吸商＝0.7〜0.8	ダイズの発芽	呼吸商＝0.8
				ゴマの発芽	呼吸商＝0.7

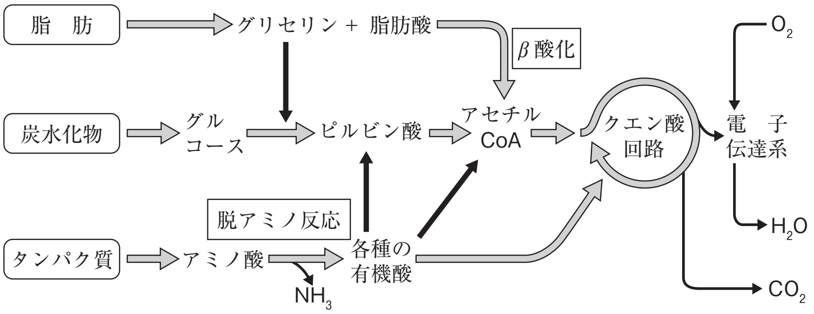
◆その他の呼吸基質

・タンパク質の消化と代謝

…タンパク質は胃液のペプシン，膵液のトリプシン，小腸壁のペプチダーゼによってアミノ酸にまで分解，小腸にて吸収される。アミノ酸が呼吸基質として用いられるときは，まず脱アミノ反応によってアミノ基がアンモニアとして遊離，アンモニアは肝臓で尿素に変換され，腎臓から排出される。アミノ基が取り除かれた他の部分はクエン酸回路で分解され呼吸基質となる。

・脂肪の代謝

…胆汁に含まれる胆汁酸によって脂肪は乳化され，膵液に含まれる消化酵素リパーゼによってグリセリンと脂肪酸に分解される。グリセリンは C_3 化合物としてピルビン酸経由で，脂肪酸は端から C_2 化合物として切断され，アセチル CoA としてクエン酸回路に取り込まれる。（β 酸化）



©RECRUIT HOLDINGS
本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

第15講　演習問題

生物体を構成する主な有機物は，炭水化物，脂質，タンパク質，核酸である。生物は有機物を分解することによりエネルギーを得て，生命活動に必要なATPを生成している。このはたらきを呼吸と呼び，多くの酵素が関係している。酸素が少ない環境条件で，有機物を分解してエネルギーを取り出すはたらきを発酵と呼ぶ。その１つに，グルコースからエタノールを生じる反応があり，アルコール発酵と呼ばれる。乳酸発酵もその1つで，どちらの反応も呼吸基質のグルコースはピルビン酸にまで分解される。利用できる酸素が十分ある場合には呼吸を行う。呼吸は３段階に分けられる反応系を経て有機物を無機物にまで分解し，エネルギーを取り出す。呼吸基質が分解されるとき，放出されたCO_2の体積を，吸収されたO_2の体積で割った値を呼吸商と呼ぶ。呼吸基質によって呼吸商の値が異なるので，呼吸商から呼吸基質を推定できる。また，呼吸と発酵の割合を推定することもできる。以下の各問に答えよ。

問１　下線部の3段階に分けられる反応系の名称を反応が進む順に記せ。2番目の反応と3番目の反応に関与する酵素のある場所はミトコンドリアのうちのどこか。図1の記号ア～エから選び，その名称も記せ。

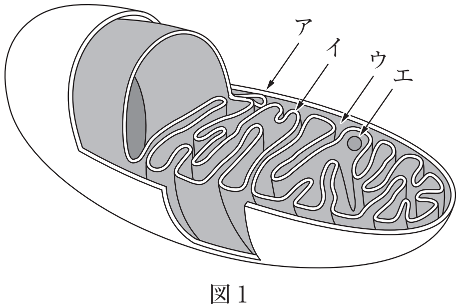


図１

問２　ミトコンドリアが好気性細菌に由来する（共生説）と考えられる根拠を2つ記せ。

問３　トリパルミチン（$C_{51}H_{98}O_6$）とイソロイシン（$C_6H_{13}NO_2$）が呼吸基質として使われたときの化学反応式をそれぞれ記せ。また，それぞれの呼吸商を，小数第3位を四捨五入して小数第2位まで求めよ。

ⒸRECRUIT HOLDINGS

本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

問4　等量の発芽種子を入れた図2の装置を2つ用意して，ある植物の種子の呼吸商を求める実験をした。装置1では中央のビーカーに水を，装置2では10％水酸化カリウム溶液を入れ，暗黒下に一定時間置いた後に気体の体積を測定した。その結果，装置1では2.7mL，装置2では，9.0mL減少した。この植物の種子の呼吸商を計算せよ。また，この場合，炭水化物，タンパク質，脂肪のうちどれが呼吸基質として使われたと推定されるか。1つ選び名称を記せ。

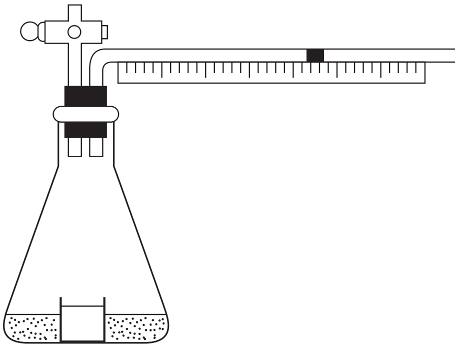


図2

問5　図2と同じ装置を使い，5％のグルコース溶液に酵母菌を加えたものを使って問4と同様に実験したところ，呼吸商は2.5であった。このとき溶液中で進んだと考えられる呼吸と発酵の化学反応式を記せ。反応後，33mgのグルコースが消費されていた。それぞれの反応で消費されたグルコースの量[mg]を求めよ。原子量はC＝12，H＝1，O＝16として，小数第2位を四捨五入して，小数第1位まで求めよ。

ⒸRECRUIT HOLDINGS

本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

第15講　確認テスト

呼吸に関する次の文章を読み，下記の問いに答えよ。

細胞の呼吸とは食物を酸化分解し，二酸化炭素や水として排出する現象を指す。この過程で呼吸基質のもつ化学エネルギーはATPとして取り出され，このATPは加水分解によってADPとリン酸になり，エネルギーが放出される。呼吸には呼吸基質をa)酸素を用いずに分解する発酵と，酸素を用いて分解する呼吸がある。発酵と呼吸に共通の代謝過程は［ア］と呼ばれ，グルコースからピルビン酸（C_3分子）を生成する。生じたピルビン酸はその後，発酵においてはアルコール発酵によってC_2分子を生成したり，乳酸発酵によって別のC_3分子に変換されたりする。一方，呼吸ではピルビン酸は［イ］によって二酸化炭素と[H]を生成する。生成した[H]は［ウ］を経て最終的に水として放出される。

問１　本文中の空欄［ア］～［ウ］に入れるのに最も適当なものを，次の①～⑥のうちから１つ選べ。

① カルビン・ベンソン回路　② 酢酸発酵
③ クエン酸回路　④ 解糖系
⑤ 電子伝達系　⑥ 光化学系

問２　呼吸の３つの経路（［ア］，［イ］，［ウ］）にそれぞれ当てはまる化学反応式を，次の①～⑥のうちから１つずつ選べ。

① $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_3H_6O_3$
② $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_3H_4O_3 + 4[H]$
③ $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$
④ $6CO_2 + 12H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$
⑤ $24[H] + 6O_2 \longrightarrow 12H_2O$
⑥ $2C_3H_4O_3 + 6H_2O \longrightarrow 6CO_2 + 20[H]$

問３　下線部a)に関連して酵母菌は呼吸とアルコール発酵の両方を同時に行うことができる。ある酵母菌が96mgの酸素を吸収し，220mgの二酸化炭素を放出したとする。なお，これらの反応に関与する化学物質の分子量はグルコース（$C_6H_{12}O_6$）：180，二酸化炭素（CO_2）：44，酸素（O_2）：32を用いよ。

(1)　このとき消費したグルコースは何mgか，３桁の整数で答えよ。

(2)　酵母菌が96mgの酸素を吸収し，(1)で消費したグルコースの二倍のグルコース量を消費したとすると，発生した二酸化炭素は何mgか，３桁の整数で答えよ。

©RECRUIT HOLDINGS

本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

問４　細胞の呼吸基質と関係する呼吸商についての記述として最も適切なものを選びなさい。

① ヒトの平均呼吸商は0.74である。

② ネコの平均呼吸商は0.96である。

③ 呼吸商は$\frac{酸素の体積}{二酸化炭素の体積}$で算出される。

④ 呼吸商は$\frac{二酸化炭素の重量}{酸素の重量}$で算出される。

⑤ 呼吸商が1.0のとき，呼吸の基質はアミノ酸のみである。

⑥ 呼吸商が0.7のとき，呼吸の基質は脂質のみである。

©RECRUIT HOLDINGS

本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

第15講　演習問題

問1　解糖系，クエン酸回路，電子伝達系

　2番目…エ，マトリックス　　3番目…イ，内膜

問2　染色体DNAとは別に独自のDNAを持つ，

　内外異質の二重膜を持つ

問3　トリパルミチン　0.70

$$2C_{51}H_{98}O_6 + 145O_2 \longrightarrow 102CO_2 + 98H_2O$$

　イソロイシン　0.80

$$2C_6H_{13}NO_2 + 15O_2 \longrightarrow 12CO_2 + 10H_2O + 2NH_3$$

問4　0.7，脂肪

問5　呼吸　6［mg］

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \longrightarrow 6CO_2 + 12H_2O$$

　発酵　27［mg］

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

ⒸRECRUIT HOLDINGS
本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。

第15講　確認テスト

問１　ア　④　イ　③　ウ　⑤　問２　ア　②　イ　⑥　ウ　⑤
問３　⑴　270mg　⑵　352mg　問４　⑥

【解説】

問１　発酵と呼吸に共通の代謝過程は解糖系と呼ばれる。解糖系は細胞質基質で進行し，嫌気的な条件下でグルコースが二分子のピルビン酸に分解される。また，その過程で２分子のATPと４分子の水素が生成する。さらに呼吸では，ピルビン酸はミトコンドリアのマトリックスで進行するクエン酸回路の基質として利用され，二酸化炭素と水素に分解される。解糖系やクエン酸回路で得られた水素はミトコンドリア内膜の電子伝達系に運ばれ，そこで酸素と反応することで水を生じる。その過程で多量のATPが合成される。以上より，［ア］解糖系の④，［イ］クエン酸回路の③，［ウ］電子伝達系の⑤が正解となる。

問２　解糖系の基質はグルコース，生成物はピルビン酸と水素であり，化学反応式は②となる。クエン酸回路の基質はピルビン酸と水，生成物は二酸化炭素と水素であるので，化学反応式は⑥となる。また電子伝達系では，水素と酸素が反応し水が生じるので，化学反応式は⑤となる。

問３　酵母菌は外部の酸素条件に応じて，呼吸とアルコール発酵を使い分ける。呼吸とアルコール発酵の化学反応式は，以下のものになる。

呼吸　$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \longrightarrow 6CO_2 + 12H_2O$

アルコール発酵　$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$

⑴　酸素吸収量が96mgであることから，呼吸で消費したグルコースは90mg，放出した二酸化炭素は132mgとなる。アルコール発酵で放出した二酸化炭素は，220－132＝88mgとなるので，アルコール発酵で消費したグルコースは180mgとなる。ゆえに，グルコースの合計消費量は，90＋180＝270mgとなる。

⑵　酸素吸収量が96mg，グルコース消費量が540mgである。酸素吸収量より呼吸で消費したグルコースは90mg，放出した二酸化炭素は132mgとなるので，アルコール発酵で消費したグルコースが540－90＝450mg，その場合の二酸化炭素放出量は220mgとなる。ゆえに，発生した二酸化炭素の合計は，132＋220＝352mgとなる。

問４　雑食のヒトの呼吸商は0.9程度，肉食のネコの呼吸商は0.7～0.8の値になる。呼吸商はCO_2/O_2の体積比であり，重量比ではない。以上より，⑥が正しい。

©RECRUIT HOLDINGS
本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。